

西南纵向岭谷区河道生态需水计算方法

崔保山*, 胡波, 杨志峰

(环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要:西南纵向岭谷区流域独特的地理地貌、气候气象、生态水文以及人文社会环境决定了河道生态需水计算的特殊性。时空尺度上的跨越性及梯度效应决定需要从时空以及频度尺度上进行河道生态需水量的界定, 在进行区域生态特征分析的基础上提出了生态径流-需水系数综合计算河道生态需水量模型; 基于河道生态特征、功能、结构以及社会环境与河道生态需水量间的相互关系, 构建了河道生态需水评估指标体系, 包含生态需水特征分析指标、需水影响要素分析指标以及需水趋势分析指标3部分, 为进行河道生态需水计算提供定量计算与定性分析依据; 根据河流水文情势的周期性变化, 提出变异系数与生态特征指数综合设定河道生态需水等级系数的方法; 考虑到水文情势的自然摆动, 提出了生态径流量的频度计算方法; 本文并以澜沧江为例就有关的过程进行说明。

关键词:生态需水量; 河道; 需水系数; 频度; 纵向岭谷区

文章编号:1000-0933(2006)01-0174-13 **中图分类号:**P333.1, Q14 **文献标识码:**A

Calculation methods of ecological water requirements for in-stream in the Longitudinal Range-Gorge Region

CUI Bao-Shan, HU Bo, YANG Zhi-Feng (State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 174 ~ 185.

Abstract: The Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR) is the gorge located in north-south directed mountains and valley in southwest China. Unique geographical location and atmospheric circulation lead to stereo-effect and "Corridor-barrier" functions in this region. And the Longitudinal mountain-valley area in northwest YunNan is also the river source area of Yangtze, Lancang and Nujiang rivers. In this area, the special topography and geomorphy and the characteristics of the three river's parallel running and the alternation of high mountains with deep valley bring about a stereo-effect of water resource. As a result of "Corridor-barrier" function, this area has three major characteristics: distinct influence of stereo-crossing effect; obviously cascade location of vegetation, water resources, climate and other characteristics; developed dry valleys and their fragile environments, and diverse ecosystems and their complicated patterns. In view of abundant biological and esthetic cultural diversities, this region is considered as the most important area of biological diversity projection and scientific research, and ecological changes in this region will influence Chinese trans-boundary ecological security and resource security.

In recent years, with the exploitation and operation of the cascade hydropower station, the ecosystem health of the LANCNAG River of the Longitudinal Range-Gorge Region has been seriously affected by the construction and the operation of those dams. And the ecological water requirements, the most important basis to maintain the ecological health of the Longitudinal Range-Gorge

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB415104); 国家科技攻关西部专项资助项目(2002BA901A22-05)

收稿日期:2005-08-20; **修订日期:**2005-11-18

作者简介:崔保山(1967~), 男, 河北沽源人, 博士, 教授, 主要从事湿地生态过程与环境响应研究. E-mail: cuibs@bnu.edu.cn; cuibs@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: cuibs@163.com

Foundation item: National Key Basic Research Development Program of China (No. 2003CB415104), the western project of National Project (No. 2002BA901A22-05)

Received date: 2005-08-20; **Accepted date:** 2005-11-18

Biography: CUI Bao-Shan, Ph.D., Professor, mainly engaged in wetland ecological process and environmental response. E-mail: cuibs@bnu.edu.cn; cuibs@163.com

Region, have attracted most of our attention. According to our field investigation of the Longitudinal Range-Gorge Region and analysis of the collected data during the investigation, the ecological water requirement of the Longitudinal Range-Gorge Region mainly includes the following several respects: the basic flow which is used to maintain the basic form of river; the environmental (purifying) flow which keeps water of the river in a good quality to maintain its basic function; the transporting sediment flow which is used to maintain and regulate water sediment balance; the ecological flow which is used to provide enough water in order to guarantee the survive of living beings in the river and their habitat. Considering the supporting information data, the present paper adopts the ecological runoff-grade coefficient of ecological water requirements methods.

Firstly, based on the analysis of the correlation between ecological run-off and the ecological water requirements, this paper brings forward a new method of the calculation of ecological water requirement, that is, ecological runoff—grade coefficient of ecological water requirements methods. Secondly, built on the annual measure runoff, the present paper uses the ecological characteristic comparison and statistical methods including variation analysis and concentration analysis to calculate the grade coefficient of ecological water requirements in the three different regions of the Longitudinal Range-Gorge Region, and uses the frequency method to calculate the ecological runoff based on principle of small runoff with big frequency.

At last, this paper calculates the ecological water requirements in the Longitudinal Range-Gorge Region. During this process, this paper combines the grade coefficients of EWR with ecological runoff to calculate the Longitudinal Range-Gorge Region ecological water requirement, by using the frequency and Coefficient of variation methods. Considering the big difference in coefficient of variation of runoff in flood and in non-flood season, this paper calculates the ecological water requirement respectively.

Key words: ecological water requirements for in-stream; coefficient of ecological water requirement; frequency; Longitudinal Range-Gorge Region

河道生态需水量是指维系河道生态系统健康所必须的水量,其对河流生态系统的结构、功能、形态的维护具有重要的意义。从结构功能上看,河道生态需水是由多元变量组成的一个有机整体,包含河道基流量、河道输沙需水、下渗与蒸发需水、净化需水、河滨带湿地需水、生态景观需水等各个结构功能需水量^[1-7]。目前关于河道生态需水量的计算方法比较多,但多数是集中在小流域内、东西走向的跨经度较大、且以干旱与半干旱河流为主,对于小经度范围内跨越较大纬度的纵向狭长河谷类型的河流研究很少。在水资源日益短缺的今天,水资源日益成为一种生存资源,在被动的研究干旱半干旱河流水资源配置以及河流健康的同时,我们应当主动的去研究水资源较为充足但水资源需求潜力大且矛盾突出的河流的生态健康问题,这不仅适应了水资源的可持续发展目标,而且对于处理水资源纠纷问题也提供了必要的理论与技术支持。

西南纵向岭谷区(Longitudinal Range-Gorge Region: LRGR)是指位于我国西南、与青藏高原隆升直接相关联的横断山及毗邻的南北走向山系河谷区,是元江-红河、澜沧江-湄公河、怒江-萨尔温江和伊洛瓦底江4条国际大河的上游,与缅甸、老挝、越南相连,与泰国、柬埔寨和印度相近,是我国与东南亚极为重要的生态廊道^[3](图1)。地势由北向南呈阶梯状下降,主体地貌特征表现为高山峡谷相间,随山脉南延;雄奇的纵向山系、大河,构成了全球独特的高山峡谷景观,也使得该地区的生物群落、物种多样性十分显著,生态系统特征明显;受东亚季风和南亚季风的影响,水资源充沛,但受到地形地貌的影响,降水随时空变差较大,水资源的时空分布不均,同时由于人类活动的影响,尤其是干流大型水电站的规划与建设使得水资源的可持续发展具有不确定性。近年来,怒江“两库十三级”电站以及澜沧江“两库八级”电站的梯级开发引起了人们对于水资源健康的讨论。在这种背景下,进行生态需水的研究对于维系水资源的合理利用、保证人水合一以及水资源的可持续发展具有十分重要的意义。

1 属性分析

1.1 区域特点分析

降水、蒸发、气温、水汽输送等气候条件的极大差异和地形地貌的综合作用,形成了西南纵向岭谷区独特

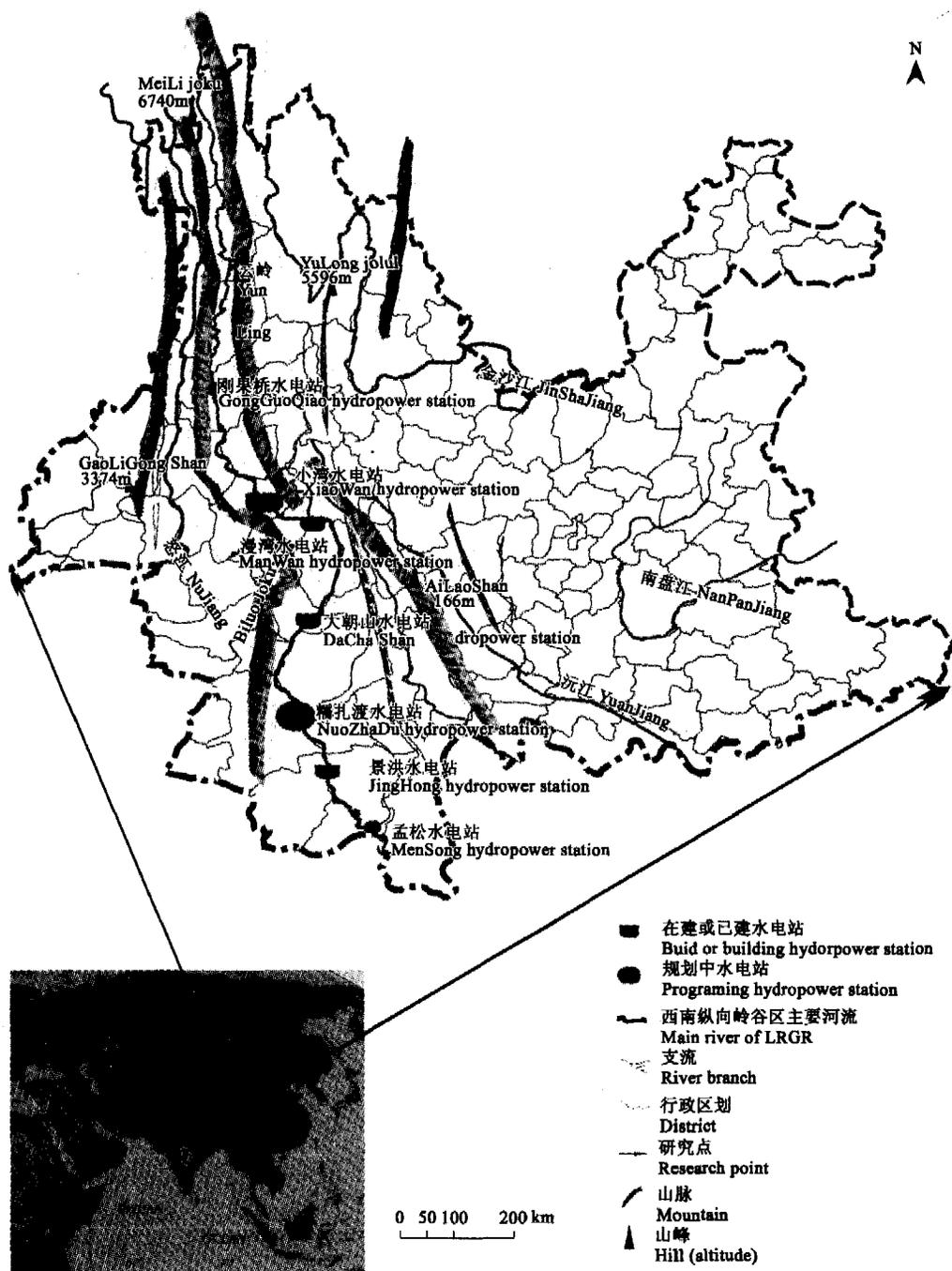


图1 西南纵向岭谷区位置

Fig.1 The position of Longitudinal Range-Gorge Region

的气候、生态以及水文水资源特征：

(1)立体交叉作用显著 即南北“通道”与东西“阻隔”的交叉作用(图2),其形成主要是由于大气环流、南北走向山脉对季风的阻挡作用以及人类活动的影响^[3]。

受东亚季风和南亚季风的影响,流域内形成明显的冬干夏雨季气候,但大气环流受到南北走向高山大川的东西“阻隔”作用,使得区域降水受到明显影响,河流两侧阴坡与阳坡降水差异明显,这种“阻隔”作用还导致区域内干旱河谷的发育,使得区域生态复杂与脆弱并存。河流的南北“通道”作用实现了流域的能量、物质以及信息的迁移,但同时也使得流域生态环境影响变化效应的纵向迁移作用愈加显著。总之“通道-阻隔”的

立体综合作用构建了西南纵向岭谷区的典型特征。

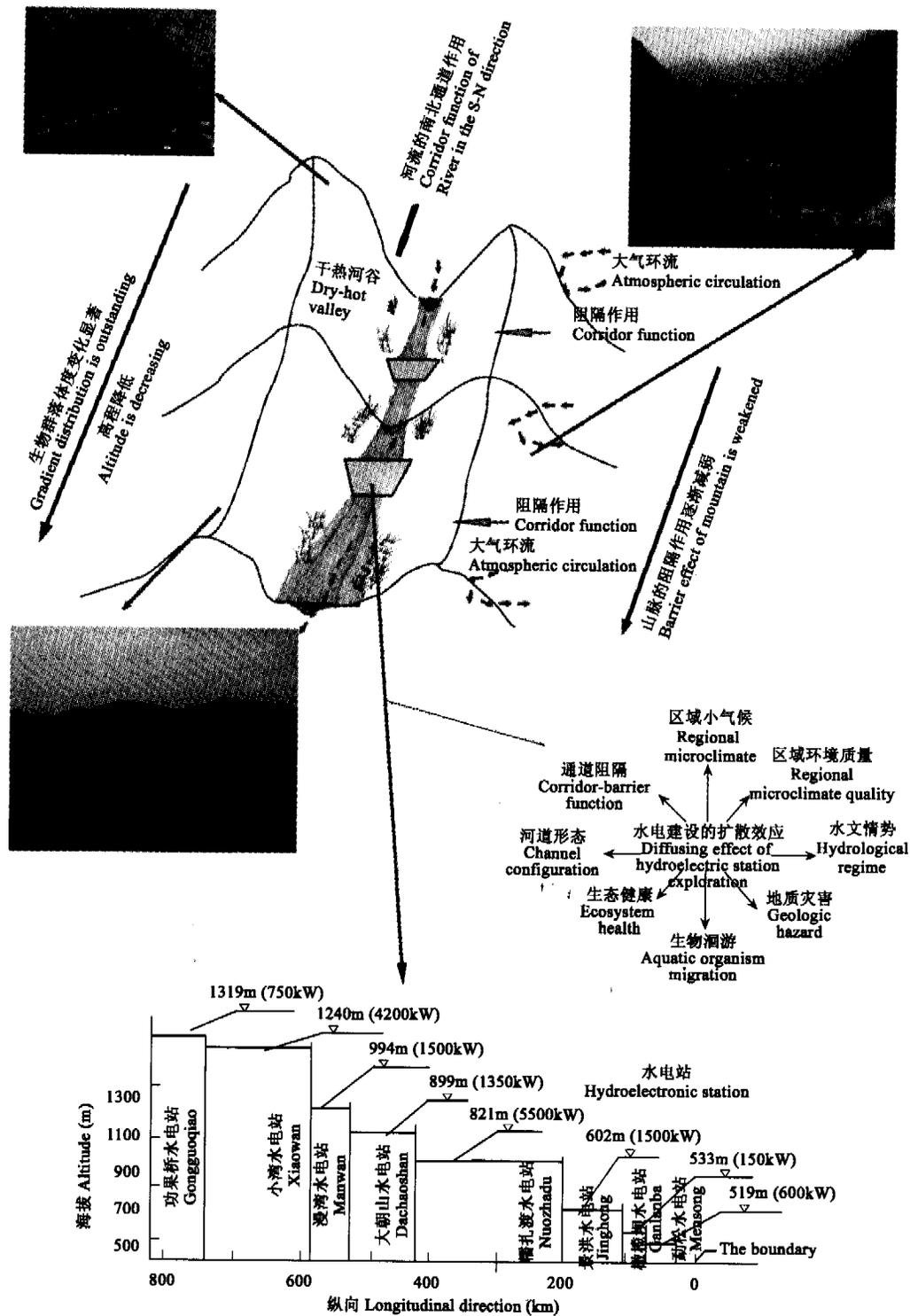


图 2 西南纵向岭谷区区域特点图

Fig.2 Regional characteristics of longitudinal Range-Gorge Region

(2)梯度分布突出 气候气象、水文情势以及地理地貌的作用,使得区域内南北生物群落类型、流域小气候、水资源分布、河道形态、河漫滩分布等特性呈现梯度变化。

随纬度的南延,从上游至下游区域流经寒带、寒温带、温带、暖温带、亚热带和热带;随海拔高度的变化,从

河谷至山顶呈热带、亚热带、温带、寒带等气候带分布以及半干旱、半湿润、湿润等气候类型差异,垂直方向1.0km的气温变化量相当于中国水平方向上约2000km的气温变化量;多样的气候以及地理地貌特征形成了多种多样的栖息地,也使得生物的分布呈现明显的梯度变化,以典型的西南纵向岭谷区水系澜沧江水系为例:从上游典型的高山深切“V”型峡谷至下游的中低山宽浅“U”型峡谷,河漫滩是逐级发育;由上游的冷水性鱼类(裂腹鱼、高原鳅)过度到下游的暖水鱼类(鲃类、鲟类等),由简单的区系组成发展到复杂的区系组成;而流域山地森林植被的分布,无论从种类、组成还是结构,随着高程的变化,基本上分为热带北缘雨林、季雨林类型,南亚热带山地季风常绿阔叶林,滇西山半湿地常绿阔叶林、云南松林类型,滇西北山地寒温性针叶林类型四种森林植被类型,垂直梯度分布明显。

(3)水文效应显著 由于立体交叉作用以及梯度分布特点使得区域内水文效应显著。

水资源垂直变化明显 气候要素随高程的变化,导致水资源分布的垂直变化亦十分明显和普遍,呈现明显的高低相间的特点,主要表现为河谷小、山顶大。

降水量经度差异明显 降水量从伊洛瓦底江的3299.9mm、怒江(萨尔温江)的2249.4mm、澜沧江(湄公河)的1226.6mm,到金沙江(长江)的946.5mm;径流深从伊洛瓦底江的2660.5mm、怒江的1619.8mm、澜沧江的677.6mm,到金沙江的456.8mm,差异明显^[3,10]。

径流年内、年际变化显著 由于受季风气候影响,径流的形成和年内变化主要受降水的影响,其年内分配表现为夏丰冬枯、春秋过渡的变化。区内年径流主要集中在汛期,其中汛期径流占年径流量的百分比为61%~85%,枯季径流占年径流量的平均百分比为15%~39%。各流域水资源量的年际变化小于年内变化,年径流变差系数Cv值最大的是澜沧江,其次是金沙江、怒江和独龙江^[3,10]。

1.2 研究尺度分析

基于研究区独特的“通道-阻隔”交叉作用、梯度效应以及生态水文特征,本文从空间、时间以及频度3个尺度进行分析。

1.2.1 空间范围界定 河道生态需水空间尺度的界定是为了确定需水承载主体范围。虽然河道生态需水会随着空间位置的变迁而发生改变,尤其在西南纵向岭谷区这个地势变差显著的区域。尽管如此,依据连续性和相似性原理,河道生态需水量在空间上具有相关性,在没有重大外界干扰的情况下,相邻河道区段生态需水量具有渐变性。西南纵向岭谷区独特的自然地理以及水文气象特征使得河道生态系统沿垂直梯度变化明显,由于主要河流中干流的大型梯级水电的开发和规划,使得河道生态需水以水库节点为突变点发生明显差异。因此,综合考虑西南纵向岭谷区独特的地理地貌、水文气象以及人类活动的影响,本文主要是从“点、段、面”三个角度进行研究的尺度的划分。

从纵向定量计算角度看:“点”主要是影响河道生态需水量的控制点,如人类活动的影响点,包括水库节点、干支流交汇点、人类居住点、工农业废水排污点等;生态系统的控制点,包括特殊生物的预留区、自然保护区以及水源保护区等;监测点,包括水文监测站点、气象台等。“段”主要是从河流的连续体角度进行分析,即从河流的上、中、下游进行河道生态需水的研究。“面(区)”主要是考虑流域内(河道两侧分水岭内流域)气象(降水、气温)、社会因素(水土保持、环境政策、植树造林等)与水资源的相关性,从较为宏观的尺度上进行河道生态需水的分析。从横向定性分析角度看:“点”依旧是影响控制点,而“段(线)”则是以横断山(高黎贡山、碧罗雪山、云岭、哀牢山)作为分割依据,用来分析整条河流的生态需水状况,进行横向比较,而“面”主要是整个流域作为一个研究层面进行宏观分析。

无论横向分析还是纵向计算,“点”都是指控制点,进行河道生态需水分区段的依据点,“段”都是实际应用层面,是进行定性分析以及定量计算的载体;而“面”都是从整体的角度进行影响要素分析或需水趋势变化预测的角度进行的。这三者是相互联系相互作用的,“点”是“段”划分的依据,“段”是“点”的集合与应用,“面”是“点”与“段”的检验,并决定“点”的选取。综合考虑生态效应及生态特征状况,以规划与建设中的大型水电站为划分依据,将西南纵向岭谷区流域划分为8“点”11“段”4“区(面)”。而本文以位于碧罗雪山、云岭与哀牢

山间的澜沧江为例进行生态需水计算方法探讨,划分依据的主要监测站点(水文站)与影响控制点(水电站)的耦合点,划分结果为3“点”3“段”1“区(面)”。

1.2.2 时间范围界定 从理论角度看,河道生态需水要求常年都能得到保证,但因生态需水一般只在枯水季节受到威胁,所以研究的时间尺度主要指受胁迫的时段,一般是以汛期非汛期作为时间研究的尺度,其基本时间序列单位一般是月份或季节。但是并不是研究尺度越细微越好,宏观尺度上研究河道生态需水量变化趋势,一般又是以年作为主要时间单位进行。以澜沧江为例进行河道生态需水计算研究的时间尺度的探讨。

根据统计分析,可得澜沧江多年逐月径流量年内变化趋势分析图(DPS处理得)以及3个水文站点的多年径流量突变图(Menn-Kendal 检验)。其中,澜沧江多年逐月实测径流量的趋势变化相关系数 $\rho = 0.93749182$,汛期非汛期时间范围明显,其分别为每年的6~10月份和11~翌年5月份,其它南北纵向河流除伊洛瓦底江片区的独龙江都具有类似的单峰型年内径流变化特征。由于支流补给区内有融雪径流补给,独龙江径流年内分配呈明显的双峰型,即3~4月份为第1个小汛期、7~10月份为主汛期。故汛期非汛期可作为研究河道生态需水量年内变化的一个重要的时间域。由澜沧江多年年径流量的突变分析图、距平图以及变差分析图,可得:澜沧江上、中、下三段径流并没有明显的突变点,但在20世纪60年代至70年代初和20世纪90年代中后期径流出现略微明显的变化,这是当时人类活动以及环境变化的综合作用结果(图3)。

经过对西南纵向岭谷区典型南北向国际河流澜沧江的多年逐月实测径流量分析,本文对河道生态需水计算研究的时间尺度分为两部分:一是以年为时间单位,主要分析需水量的年际变化趋势;二是以汛期非汛期作为研究时段,分析需水量的年内变化。

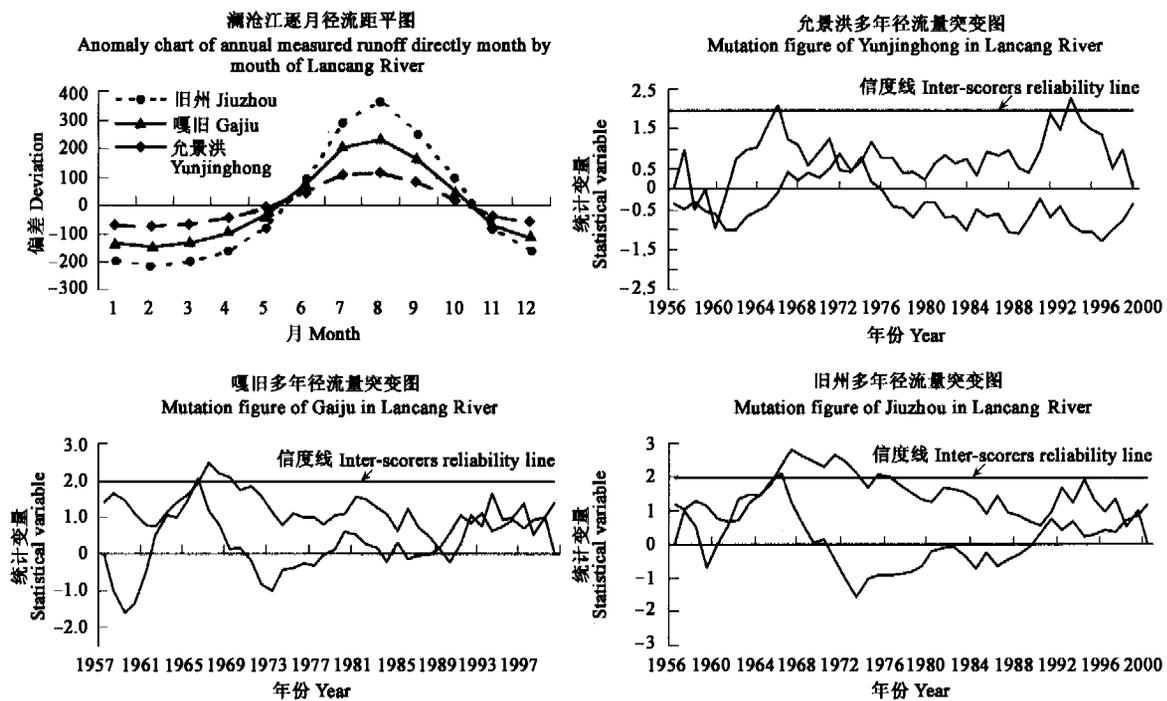


图3 澜沧江径流量变化特征图

Fig.3 Characteristics of the runoff trend in the Longitudinal Range-Gorge Region

1.2.3 频度范围分析 进行河道生态需水量的计算,归根结蒂,是最大程度上去模拟河道生态需水量,即分析与实际河道生态需求量最为接近的生态需水程度。不考虑生境影响的需水等级,从统计学上讲,就是分析反映河道生态系统最佳状况的河道生态径流量的出现频率问题,公式如下:

$$P = f(n) = f\{n(X \geq x)\}$$

式中, P 为满足假设($X > x$)的出现频度,即表征变量 X (径流量)大于或等于 x (径流量)时的出现频率; n

为假设的出现次数,表征检验的年数。

以澜沧江为例,基于多年逐月实测径流量数据进行趋势分析,分析数据的实际操作性及水文情势的稳定性。根据澜沧江多年逐月实测径流量特征值图(图4):多年实测径流量从20世纪50年代末至60年代初有较大的增幅,从20世纪60年代末至80年代末径流量有所降低,从20世纪90年代至今径流量有了较小的回升,但是还未达到20世纪50年代的水平;多年最枯月实测径流量相似,且均值线与趋势线基本吻合,数据能够较好的反映实际径流的趋势变化;径流量的出现频度具有一定的规律性,起落有秩,数据资料具有同一性,可采用频度法进行生态径流量的模拟。

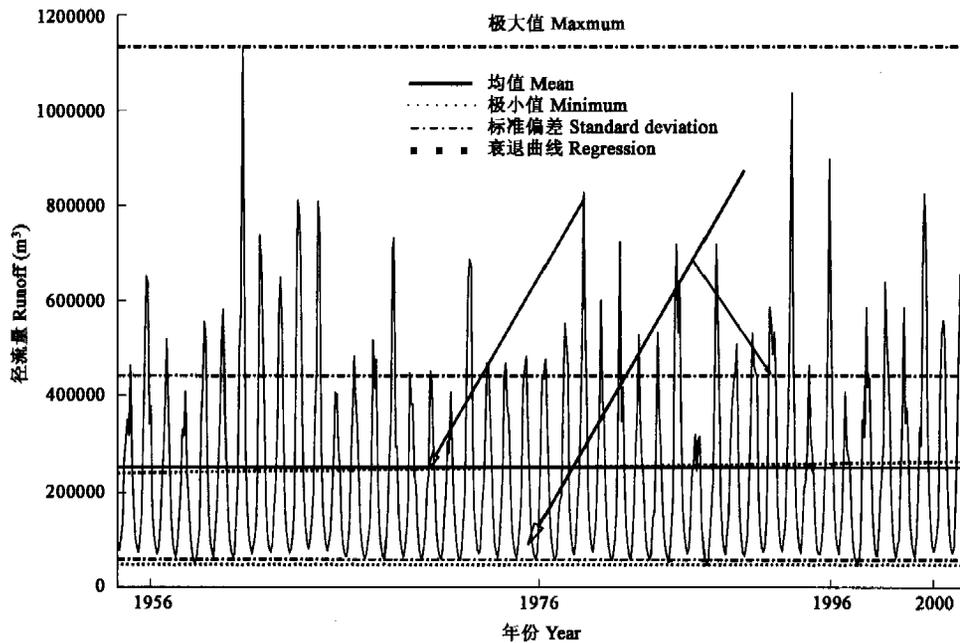


图4 澜沧江多年逐月实测径流量变化特征

Fig.4 Characteristics of the annual measured runoff trend in the Longitudinal Range-Gorge Region

1.3 计算方法分析

河川径流作为影响河流基本生态功能实现的重要控制因素,与河道生态需水具有必然的联系。河道生态需水从属于河川天然径流,进行河道生态需水的计算以寻找一个最佳相似河道生态系统需求的水量。通过综合分析西南纵向岭谷区的生态状况及已有的数据资料,本文提出生态径流量与等级参数综合分析法。

(1)生态径流量是指能反映河道生态最佳状况的河道实际径流量;而实测径流量即是河道内的实际现状用水量。

(2)自然河流的最大特征就是水文情势的周期性波动,河流生态系统的周期性变化与实测径流量的年内、年际变化的之间存在一种相关性;河川径流的周期性波动导致了河流淤积与侵蚀的交替变化,从长时间尺度上看,这些变化决定了河流生态系统生物群落的基本生存条件。

(3)河道径流的周期性波动实现了河流的基本生态功能,如:维系河流形态(输淤、冲蚀)、净化河流水质(物理、化学、生物)、促进河漫滩栖息地生物的生命周期活动(繁殖、配偶、迁移)以及实现河漫滩栖息地的物质、能量交换等功能。

(4)稀缺性径流量,是指在特定环境下完成某一特定功能的径流量;从生态功能的角度看,河川径流的周期性波动径流差即为稀缺性径流量。

(5)采用频度法计算的生态径流量,能够准确地反映径流量频度的集中程度;而反映多年实测径流量离散程度的变异系数,能够分析河流水文情势的自然摆动,把二者结合起来能够有力的反映出河道水文情势变化

带来的河道功能的实现。基于以上的分析,河道生态需水量计算概念模型如下:

$$\begin{cases} Y_k = \varphi_k(t, Q, b)Y' + \sigma \\ \varphi_k = f(cv, b) \\ Y' = f(t, Q, F) \end{cases} \quad (1)$$

式中, Y 为目标函数, 表征河道生态需水量, $k = 1, 2, 3$, Y_1, Y_2, Y_3 分别表示最小、适宜、理想生态需水量; φ_k 为河道生态需水等级系数, 表征了不同级别的河道生态需水状况, 为时间 t 、流量 Q 以及区域生态特征指数 b 的函数; σ 表征河道生态需水量纠正参数, 是由特殊的生态功能需水量决定的; Y' 表征生态径流量, 其下标表征不同的功能生态径流量, F 表征生态径流量频度; 向量 f 表征计算准则。

2 河道生态需水评估指标体系

评估指标以一种描述评估对象所处状态和特征的科学语言, 河道生态需水评估指标是指基于河道生态状况、地区特征以及影响要素的分析结果而对维系河道一定健康程度下的结构功能的需水量的程度性分析指标, 其主要包括评估河道生态系统需水特性、诊断河道生态需水影响因素以及预测河道生态需水趋势变化的一套包含水文、生态、地理地貌、气候气象、社会环境等要素的各种指标的有机整体。

生态需水评估指标是指用来推断或解释该生态系统需水量的相应变量或组分, 并提供生态系统或其组分需水量的综合特性、控制要素以及影响要素, 为进行河道生态需水量的计算提供定性以及定量分析依据。评估指标与评估所需的信息之间有密切的关系, 信息决定指标维数, 与河道生态需水量密切相关的地理、水文、气象气候等信息决定了其指标是一个多维体系。纵观西南纵向岭谷区独特的气候气象、水文生态、地理地貌以及人文环境, 基于不同的层次标准构建了西南纵向岭谷区河道生态需水评估指标体系。根据对地区的特性分析以及区域属性与生态需水间的相关性, 分类逐级构建了三类四级需水评估指标(图 5)。

3 需水等级系数确定和生态径流量计算模型

3.1 河道生态需水等级系数确定

水作为河流生态系统健康的重要控制因子, 其量的大小从一定程度上反映了河道健康的保证程度。河道生态需水量等级参数就是依据河流生态系统健康与水量的依托关系而确定的良好、适宜、理想河流健康状态下的河道最小、适宜、理想生态需水量的等级系数。本文主要是从区域生态特征指数与区域径流变异系数结合的层面来确定河道生态需水等级系数。

3.1.1 区域生态特征指数分析 根据河道生态需水评估指标体系以及综合西南纵向岭谷区流域的实地考察资料和典型年的生态资料, 本文选取了部分生态特征指标进行模糊综合评判。

(1) 基于区域生态特征和生态需水状况的系统分析, 确定生态系统健康相关影响因素, 给出评价因素集:

$$U = \{U_{\text{过水断面宽}}, U_{\text{土壤持水率}}, U_{\text{植被覆盖率}}, U_{\text{多样性指数}}\}$$

(2) 确定西南纵向岭谷区河道生态健康等级集:

$$V = \{V_{\text{基本健康}}, V_{\text{良好健康}}, V_{\text{理想健康}}\}$$

(3) 评价因子隶属度的确定 确定评价因子隶属度, 即采用量化的方法描述评价因子对生态系统健康级别隶属程度大小的函数形式。隶属度的确定方法有很多, 本文是根据越大越优目标相对隶属度和越小越优目标相对隶属度公式(公式 2、公式 3)进行计算:

$$\text{越大越优相对隶属度} \quad r_{ij} = \frac{x_{ij} - \bigwedge_j x_{ij}}{\bigvee_j x_{ij} - \bigwedge_j x_{ij}} \quad (2)$$

$$\text{越小越优相对隶属度} \quad r_{ij} = \frac{\bigvee_j x_{ij} - x_{ij}}{\bigvee_j x_{ij} - \bigwedge_j x_{ij}} \quad (3)$$

式中, r_{ij} 为决策 j 目标 i 的相对隶属度; $\bigwedge_j x_{ij}$ 、 $\bigvee_j x_{ij}$ 分别为决策集 $j = 1, 2, \dots, n$ 对目标 i 的特征值取大取小。

(4) 建立模糊关系矩阵 R

$$R_{m \times n} = \{r_{ij}\}_{m \times n} \quad (4)$$

式中, $R_{m \times n}$ 为 m 个评价指标的 n 级标准化指数, 其中, m 是指 4 个评价指标; n 为三类健康标准。

(5) 确立评价因素权重 A

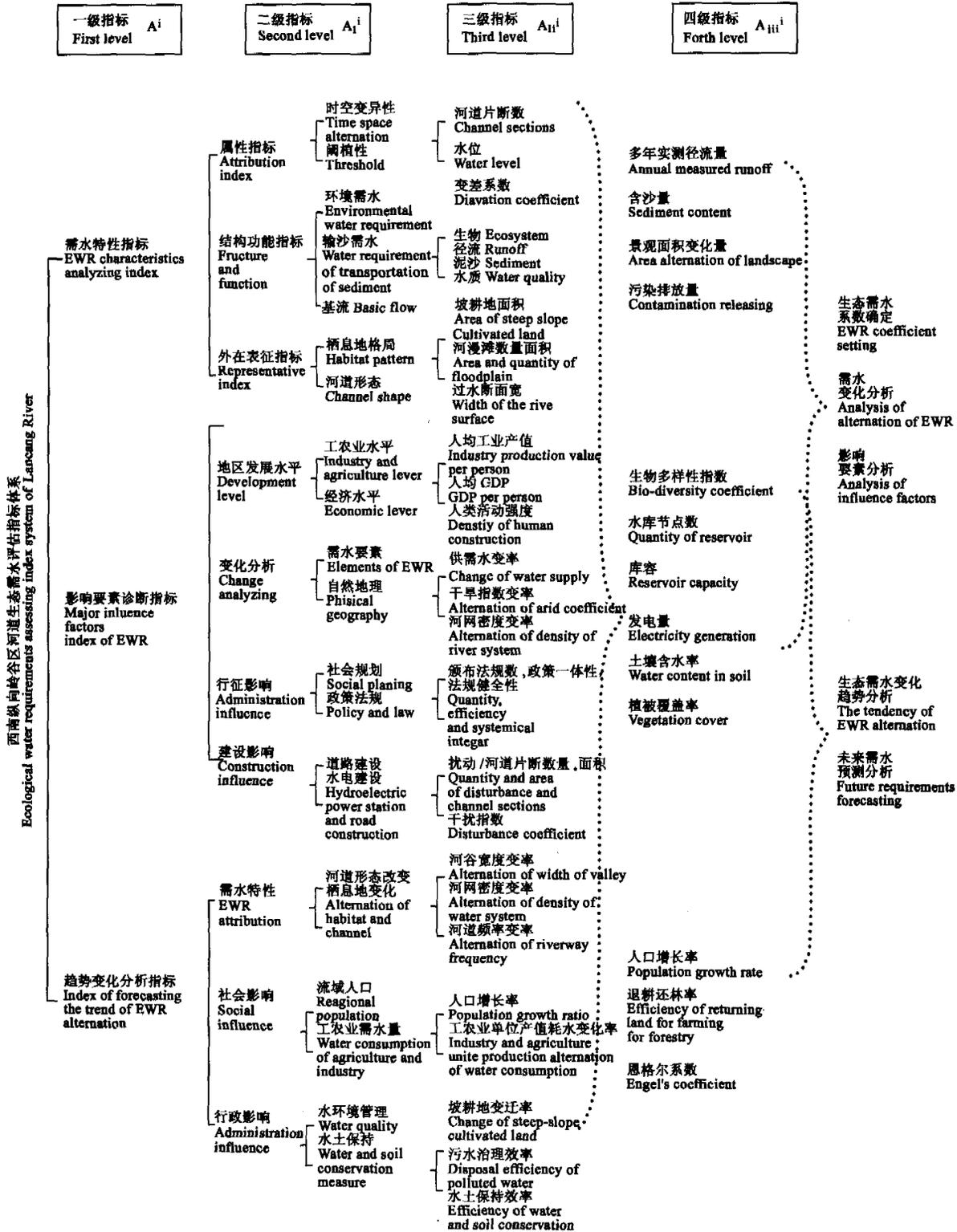


图 5 西南纵向岭谷区河道生态需水评估指标体系

Fig. 5 Index of ecological water requirements for in-stream Longitudinal Range-Gorge Region south western China

$$A = \{a_{\text{过水断面宽}}, a_{\text{土壤持水率}}, a_{\text{植被覆盖率}}, a_{\text{多样性指数}}\} \quad (5)$$

(6)模糊综合评判

$$B = A \cdot A = \{a_{ij}\}_{1 \times 4} \cdot \{r_{ij}\}_{4 \times 3} = \{b_1, b_2, b_3\} \quad (6)$$

式中, B 为西南纵向岭谷区的河道生态特征指数, b_1 、 b_2 、 b_3 分别表示不同健康等级标准下的生态特征指数值。

3.1.2 区域径流变差分析 区域生态特征指数的分析是为了确定研究区河流形态特征,为河道生态需水的计算提供定性理论分析依据。区域径流变差分析主要是分析多年实测径流量的离散程度,突出河道生态需水量的受胁迫的径流量变化。其中相关的参数有:变异系数,表征多年实测径流量的离散程度,能反映河道现状用水的变异程度,又称为变异系数和变差系数。典型年变异系数,即纠正系数。变异系数、典型年变异系数及区域生态特征系数都与生态需水具有相关性;而相互间并没有显著相关性:

$$CV = \frac{S_Q}{S_{av}} \times 100\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Q_i}{Q_{av}} - 1\right)^2}{(n-1)}} \times 100\% \quad (7)$$

$$S_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - Q_{av})^2 / (n-1)} \quad (8)$$

$$\theta = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i - Q_{av}}{Q_{av}} \times 100\%, & Q_i \geq Q_{av} \\ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{Q_{av} - Q_j}{Q_{av}} \times 100\%, & Q_j \leq Q_{av} \end{cases} \quad (9)$$

式中, CV , 为变异系数,表征年(月、汛期、非汛期)实测径流量的年际离散趋势; S_Q 为统计数据样本标准差; Q_i 为第 i 年的实测径流量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$); Q_{av} 为多年平均径流量 ($\times 10^8 \text{ m}^3$); θ 为偏差系数,表征实测径流量的实际变化程度。

3.1.3 河道等级生态需水系数计算

(1)河道最小生态需水系数设定 河道生态需水的主要功能是维系河道形态、保持冲淤平衡以及维系河漫滩地的基本生态状况,故本文采用最枯年最枯月径流现状分析、径流量稳定性参数以及生态状况综合分析进行河道最小生态需水的计算。通过三者的有力结合,可以降低因信息资料带来的误差:

$$\begin{cases} \varphi'_k = \sum \alpha_i \cdot \zeta \\ \sum \alpha_i = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, φ'_k 表征河道最小生态需水系数; ζ 表征影响河道生态需水系数的特征要素,包括最枯年最枯月径流量比率、最小生态特征指数、稳定性指数以及河道特征指数; α_i 表征特征要素与河道最小生态需水系数的相对隶属程度,即权值,可根据专家打分以及相关分析获得。

(2)河道适宜、理想生态需水系数设定 特殊的自然地理条件赋予了西南纵向岭谷区流域独特的生态特征,作为维系河道良好生态状况的适宜需水主要是满足维系流域内生态功能区健康、河漫滩地生物的生长需水以及一定的景观用水量。本文主要是通过年际变化径流量的生态功能实现来反映河道生态需水量,具体计算采用加权叠加方法。其中,自然水文波动的年际径流差异比较稳定,主要是对河道径流生态功能的补充水量,是一种改善生态状况的水量,故将其作为适宜生态需水系数的计算因子之一;而年内径流差异波动较为明显,是针对年内河道生态状况变化后自然的响应,如水土流失以及森林覆盖率的迅速变化,导致河道生态状况的急剧变化,故本文选取其作为河道理想生态需水量计算的主要依据。相关计算公式如下:

$$\begin{cases} \varphi''_k = \varphi'_k + \left(\alpha_1 \frac{1}{n} \sum cv_i + \alpha_2 b_2 \right) \\ \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中, φ''_k 表征河道适宜生态需水系数; α_i 表征特征要素与河道适宜生态需水系数的相对隶属程度, 特征要素包括变异系数(年内逐月、特征年、水平年等)和适宜生态特征指数, 二者的隶属度可通过其与河道适宜生态环境需水量的相关性确定, 并通过野外考察进行修正; b_2 表征河道适宜生态特征指数:

$$\begin{cases} \varphi''_k = \sum \beta_i \cdot \rho \\ \sum \beta_i = 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, φ''_k 表征河道理想生态需水系数; ρ 表征影响河道生态需水系数的特征要素, 包括理想生态特征指数以及年内变异系数; β_i 表征特征要素与河道理想生态需水系数的相对隶属程度:

3.2 生态径流量计算模型

作为一个实时检测量, 流量能够比较准确的分析短期生态状况, 尤其对水生生物健康具有较强的分析, 国外大多是通过分析水生生物与流量的关系来设定河道生态需水量标准; 另一方面, 流量是一个瞬间变量, 而健康是一个过程变量, 在大尺度的分析或预测时, 用一个瞬间变量来反映过程变量是不精确和不恰当的。径流量是一个过程变量, 是各瞬间变量的集合, 从流域水资源宏观调控及流域生态系统健康等层面具有很强的分析能力。基于西南纵向岭谷区独特的生态水文及自然地理地貌特征, 并综合分析国内外关于河道生态需水的计算方法, 本文提出了以下几种生态径流量的计算方法:

$$Y_k = \varphi_k Y' + \sigma = \varphi_k \cdot \begin{cases} Y' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i & (13) \\ Y' = Q_p^i(t, q) + \sigma & (14) \\ Y' = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + \sum x_j + \varepsilon & (15) \end{cases}$$

其中:

(13) 式为多年平均径流量法。式中, Q_i 为第 i 年径流量, $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为统计年数。

(14) 式为频度法, 即低径流高保证率高频度的计算方法。式中, Q_p^i 为第 i 年的年(或月、汛期、非汛期)径流量, 是根据研究区(西南纵向岭谷区典型河流)多年河道径流量频度分布来确定的; P 为多年河道径流量频度, 表征河道径流量大于或等于 Q_p^i 的出现频率, 通过统计软件分析可获得不同径流量的出现频度。

(15) 式为理想计算模型, 采用多功能综合分析方法, 在数据资料支持的情况下可通过遗传算法和神经网络进行模拟计算。式中, 变量 x_i 表示相互非独立的功能结构生态需水量 ($i=1, 2, \dots$); x_j 表示相互独立功能结构生态需水量 ($j=1, 2, \dots$); f_k 为计算准则, 各个功能需水之间的对应法则, 如: 最大化或最小化方法; 修正变量 ε_k 为补充因扣除相容需水量而遗缺的生态需水量。

4 讨论

(1) 西南纵向岭谷区独特的地理地貌、气候气象、生态水文以及社会人文特点决定了进行河道需水量计算的特殊性, 时空尺度的跨越性与梯度变化决定了生态需水标准的等级特性, 水文情势的相似性决定了生态径流量的频度计算方法的选择, 水电建设的阻隔性决定了河道生态需水计算的分段特性。基于区域特征以及河道生态需水评估分析, 从实测径流量的层面进行河道生态需水计算方法的探讨, 提出生态径流-需水系数综合计算方法, 并以西南纵向岭谷区的典型河流澜沧江进行了相关验证分析。

(2) 本基于河道生态需水评估分析及区域特征分析, 提出了反映生态特点的区域生态特征指数与反映河流生态功能实现的径流变异系数相耦合的方法进行河道生态需水系数的确定, 并提出了能够反映天然径流趋势的频度法进行径流量的生态纠正以反映天然生态需求, 并对二者进行结合综合探讨了西南纵向岭谷区河道生态需水的计算方法。

(3) 河道生态需水计算系统评估应该包含影响分析、定量计算以及预测分析, 本文从整体角度提出了河道生态需水计算的整体框架模式, 包含区域特征分析、研究尺度分析、需水评估方法、计算模型、需水系数确定以及生态径流量计算模型。

(4)综观国内外关于生态需水研究,涉及需水量计算首先要解决两个关键问题,即生态需水与系统外部健康相关性以及生态需水与内部结构功能的相关性,但由于本文只是从整体系统地提出相关的计算模型,关于基础理论并未进行详细介绍,希冀在后期工作中得以具体分析。

References:

- [1] Denis A, Hughes, Hannart P, *et al.* Continuous baseflow separation from time series of daily and monthly streamflow data. *ISSN Water SA*, 2003,29(1): 43 ~ 48.
- [2] Denis A. Hughes, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 2003,270: 167 ~ 181.
- [3] Guo Y A, Huang Y. Research on water resources characteristics and variation law in longitudinal mountain- valley area of northwest yunnan Province. *Yangtze River*, 2005,36(4):38 ~ 72.
- [4] Megan D, Ger B, John S. *Flow: The essentials of environmental flows*. IUCN, 2003.
- [5] Mike A. Linking Science and decision-making: features and experience from environmental river flow setting. *Environmental Modeling and Software*, 2005, 20:99 ~ 109.
- [6] Richard D, Rafik H. *Environmental Flows: Concepts and Methods*. The World Bank Washington, D C, 2003.5.
- [7] Schlüter M, Savitsky A, McKinney D C, *et al.* Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta: a water management model for ecological impact assessment. *Environmental Modeling and Software*, 2005, 20(5):529 ~ 545.
- [8] Vladimir S, Carmen R, Petra D. Taking into Account Environmental Water Requirements in Global-scale Water Resources Assessments. *Research Report*, 2004.
- [9] Wei Y C, Miao H, Ou Y Z Y, *et al.* Primary estimate of ecological water requirement in Haihe basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2004,24(10):2100 ~ 2107.
- [10] Wu S H, Dai E F, He D M. Major research perspective on environmental and developmental issues for the longitudinal range-gorge region(LRGR) in south western China. *Progress in Geography*, 2005,24(1):31 ~ 40.
- [11] Yang Z F, Zhang Y. Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels. *Journal of Hydrodynamics*, 2003,18(3):294 ~ 301.
- [12] Zhang Y, Yang Z F, Wang X Q. Computing method of divisional ecological and environmental water requirement for river channel and its application to the Yellow river basin. *Acta Science Circumstantiae*, 2005,25(4):429 ~ 435.

参考文献:

- [3] 郭有安,黄英.滇西北纵向岭谷区水资源特性及分异规律研究. *人民长江*, 2005,36(4):38 ~ 72.
- [9] 魏彦昌,苗鸿,欧阳志云,等.海河流域生态需水核算. *生态学报*, 2004,24(10):2100 ~ 2107.
- [10] 吴绍洪,戴尔卓,何大明.我国西南纵向岭谷区环境与发展问题初步研究. *地理科学进展*, 2005,24(1):31 ~ 40.
- [11] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较. *水动力学及其进展*, 2003,18(3):294 ~ 301.
- [12] 张远,杨志峰,王西琴.河道生态环境分区需水量的计算方法与实例分析. *环境科学学报*, 2005,25(4):429 ~ 435.